



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101982943 A

(43) 申请公布日 2011.03.02

(21) 申请号 201010502661.6

(22) 申请日 2010.10.11

(71) 申请人 复旦大学

地址 200433 上海市杨浦区邯郸路 220 号

(72) 发明人 他得安 许凯亮 王威琪

(74) 专利代理机构 上海正旦专利代理有限公司

31200

代理人 陆飞 盛志范

(51) Int. Cl.

H04B 11/00 (2006.01)

H04L 25/02 (2006.01)

A61B 8/00 (2006.01)

G06F 19/00 (2006.01)

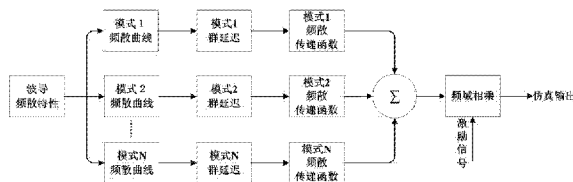
权利要求书 2 页 说明书 4 页 附图 11 页

(54) 发明名称

基于时域重排的超声导波频散补偿与多模式分离算法

(57) 摘要

本发明属于超声技术领域，具体为一种基于时域重排的超声导波频散补偿与多模式分离算法。本发明主要包括三个部分，第一部分为超声导波频散的正向仿真算法，在已知波导介质理论频散曲线的情况下，可求解不同频率成分的时延参数，从而获得任意激励下的多模式超声导波时域信号；第二部分为逆向频散补偿算法，可利用频散关系对单一模式导波各频率成分实现不同程度的时延修正，从而将原持续时间较长的频散模式能量压缩为瞬时冲击，使导波波形简单，易于分析。第三部分为基于逆向频散补偿算法，可实现超声导波的多模式分离。



1. 一种基于时域重排的超声导波频散补偿与多模式分离算法,其特征在于具体步骤为:

超声导波频散仿真算法

(1) 计算群延迟 对某一次激励,由式(1)计算某导波模式各谐波成份所对应群延迟:

$$\tau_g(\omega) = \frac{d}{v_g(\omega)} + t_0 \quad (1)$$

其中,  $t_0$  为导波激励时刻,  $d$  为发射换能器和接收换能器距离,  $v_g(\omega)$  为某一导波模式群速度与频率的关系;

(2) 求频散传递函数 根据群延迟,求得对应导波模式的频散传递函数,其表达式为:

$$H(\omega) = e^{j(-\int_0^\omega (\tau_g(\nu) - t_0) d\nu + \psi_H(0))} \quad (2)$$

其中信号  $\psi_H(0)$  为积分初值;

(3) 超声导波频散的正向仿真 根据频散传递函数,求解激励信号通过此频散系统的输出,即得某一模式对应该激励下的仿真信号,若激励信号频率为  $F(\omega)$ ,则接收信号频谱  $G(\omega)$  算式为:

$$G(\omega) = H(\omega) \cdot F(\omega) \quad (3)$$

(4) 多导波模式叠加 对不同导波模式用步骤(1)-(3)的方法分别求解,并叠加得多模式信号;

超声导波频散补偿

(5) 求频散传递函数反函数 为实现对应模式的频散补偿,求解上述步骤(2)所得传递函数的  $H(\omega)$  反函数,其表达式为:

$$H^{-1}(\omega) = \frac{1}{H(\omega)} = e^{j(\int_0^\omega (\tau_g(\nu) - t_0) d\nu + \psi_H(0))} \quad (4)$$

(6) 导波模式频散补偿 用上式(4)对某一模式实现频散补偿,若频散信号频谱为  $G'(\omega)$ ,则频散补偿算式为:

$$F'(\omega) = H^{-1}(\omega) \cdot G'(\omega) \quad (5)$$

超声导波多模式分离算法

(7) 补偿模式能量分离 对频散补偿结果分离出补偿模式瞬时激励以及欠补偿模式的混合信号;能量分离的实现方法为:1)若激励可预先测定,直接去除激励即得剩余模式信号;2)若激励不可预先测定,分离出补偿结果在零时刻附近的所有信号能量算为补偿模式能量,剩余部分为欠补偿模式能量;

(8) 频散反补偿 对步骤(7)分离结果反补偿还原信号模式;反补偿具体算式为:

$$G_s'(\omega) = H(\omega) \cdot F_s'(\omega) \quad (6)$$

其中  $F_s'(\omega)$  为步骤(7)分离结果,  $G_s'(\omega)$  为某一模式导波频散信号,  $H(\omega)$  为对应导波模式的传递函数表达式;

(9) 对剩余导波模式重复步骤(6) - (8), 至分离所有模式。

## 基于时域重排的超声导波频散补偿与多模式分离算法

### 技术领域

[0001] 本发明属于超声技术领域，具体涉及一种基于时域重排的超声导波频散信号仿真、补偿与模式分离算法。

### 背景技术

[0002] 近十年来，超声导波在长距离无损检测方面的应用研究受到广泛关注。实际传播中，超声波经常以反射与折射的形式与波导的边界发生相互作用，并发生纵波和横波间的转换，由此产生的导波对传播介质所有的信息较为敏感，从而可被广泛地应用于工业管道、工业板材、铁路轨道及长骨诊断等无损检测领域中。

[0003] 基于超声轴向传输技术，导波被成功地应用于长距离缺陷检测。但由于导波问题相对复杂，通常以多模式形态在介质中传播，并伴随着各导波模式不同的频散特性，导致接收导波大都为多模式的混合信号，这给进一步数据分析带来了困难。

[0004] 应用频散补偿方法，可对由频散造成的导波信号时域扩张加以补偿，从而将原来持续时间较长的信号压缩为持续时间较短的冲击信号。Wilcox 等提出利用已知的波数频率曲线，将时域数据在传播距离域补偿，进而可有效定位某时刻某一导波模式的表面应力位移分布情况 [参考文献 1]。在此基础上，Toiyama 等提出了一种改进型的脉冲压缩算法，并应用于频散补偿，导波  $L(0, 1)$  模式实验信号计算结果表明，此算法可在提高信噪比的同时有效抑制导波频散 [参考文献 2]。另外，多项式映射技术也被应用于波数频率曲线的拟合，即用多项式来近似单一模式导波波数频散曲线，从而实现该模式的时域补偿 [参考文献 3]。

[0005] [参考文献 1] Wilcox P D. A rapid signal processing technique to remove the effect of dispersion from guided wave signals. *IEEE Trans. UFFC*, 2003; 50(4): 419—427.

[参考文献 2] Toiyama K, Hayashi T. Pulse compression technique considering velocity dispersion of guided wave. *AIP Conf. Proc.*, 2008; 975: 587—593.

[参考文献 3] Liu L, Yuan F G. A linear mapping technique for dispersion removal of Lamb waves. *Structural Health Monitoring*, 2010; 9(1): 75—86.

以上方法的主要局限性是只能针对频带较窄的单一导波模式的频散进行补偿。实际上，接收到的导波通常为多模式信号，单一模式的导波信号激励方法也尚未成熟，无法普遍适用。特别是包括长骨检测在内的某些医用超声导波分析领域，研究对象形态结构较为复杂，更难于实现单一导波模式激励。故多模式导波补偿与分离有重要的实用价值。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的在于提供一种基于时域重排的超声导波频散信号仿真、补偿与模式分离算法。

[0007] 本发明提供的基于时域重排的超声导波频散信号仿真、补偿与模式分离算法，可

分为三个部分：应用频散信号仿真算法，得出自定义激励的宽带信号频散结果；应用频散补偿算法，实现单一模式导波频散补偿；对多模式导波，在有效频散补偿的基础上应用模式分离算法获得各个单一导波模式。本发明的具体步骤如下：

#### 超声导波频散仿真算法

(1) 群延迟 对某一次激励，计算某导波模式各谐波成份所对应群延迟的计算公式为：

$$\tau_g(\omega) = \frac{d}{v_g(\omega)} + t_0 \quad (1);$$

其中， $t_0$  为导波激励时刻， $d$  为发射换能器和接收换能器距离， $v_g(\omega)$  为某一导波模式群速度与频率的关系。

[0008] (2) 频散传递函数 根据群延迟，求得对应导波模式的频散传递函数，其表达式为：

$$H(\omega) = e^{j(-\int_0^\omega (\tau_g(\nu) - t_0) d\nu + \psi_H(0))} \quad (2);$$

其中信号  $\psi_H(0)$  为积分初值。

[0009] (3) 超声导波频散的正向仿真算法 根据频散传递函数，求解激励信号通过此频散系统的输出，即得某一模式对应该激励下的仿真信号。若激励信号频率为  $F(\omega)$ ，则接收信号频谱  $G(\omega)$  算式为：

$$G(\omega) = H(\omega) \cdot F(\omega) \quad (3)。$$

[0010] (4) 多导波模式叠加 对不同导波模式用步骤(1)-(3)的方法分别求解，并叠加得多模式信号。

#### [0011] 超声导波频散补偿

(5) 频散传递函数反函数 为实现对应模式的频散补偿，求解上述步骤(2)所得传递函数的  $H(\omega)$  反函数，其表达式为：

$$H^{-1}(\omega) = 1/H(\omega) = e^{j(\int_0^\omega (\tau_g(\nu) - t_0) d\nu + \psi_H(0))} \quad (4)。$$

[0012] (6) 导波模式频散补偿 用上式(4)对某一模式实现频散补偿。若频散信号频谱为  $G'(\omega)$ ，其具体实现为：

$$F'(\omega) = H^{-1}(\omega) \cdot G'(\omega) \quad (5)$$

$F'(\omega)$  为补偿结果。

[0013] 超声导波多模式分离算法

(7) 补偿模式能量分离 对频散补偿结果分离出补偿模式瞬时激励以及欠补偿模式的混合信号。能量分离的具体实现可用两套方案,1)若激励可预先测定,直接去除激励即得剩余模式信号;2)若激励不可预先测定,可分离出补偿结果在零时刻附近的所有信号能量算为补偿模式能量,剩余部分为欠补偿模式能量。

[0014] (8) 频散反补偿 对步骤(7)分离结果反补偿可还原信号模式。反补偿具体实现为:

$$G_s^{-1}(\omega) = H(\omega) \cdot F_s^{-1}(\omega) \quad (6)$$

其中  $F_s^{-1}(\omega)$  为步骤(7)分离结果,  $G_s^{-1}(\omega)$  为某一模式导波频散信号,  $H(\omega)$  为对应导波模式的传递函数表达式。

[0015] (9) 对剩余导波模式重复步骤(6) - (8) 至分离所有模式。

### 附图说明

[0016] 图 1 为超声导波频散仿真算法原理框图。

[0017] 图 2 为超声导波多模式分离算法原理框图。

[0018] 图 3 为 1 mm 均匀厚度钢板的频散曲线图。

[0019] 图 4 为激励信号, a) 时域波形, b) 频谱。

[0020] 图 5 为  $A_0, A_1$  和  $S_0$  三模式频散信号仿真结果, a) 时域波形, b) 短时傅氏变换后的时频分布。

[0021] 图 6 为  $A_0, A_1$  和  $S_0$  三模式频散信号仿真结果经  $A_1$  模式频散传递函数补偿后结果, a) 时域波形, b) 短时傅氏变换后的时频分布。

[0022] 图 7 为分离后的  $A_1$  模式 a) 时域波形, b) 短时傅氏变换后的时频分布。

[0023] 图 8 为去除  $A_1$  模式后的剩余信号 a) 时域波形, b) 短时傅氏变换后的时频分布。

[0024] 图 9 为分离后的  $A_0$  模式 a) 时域波形, b) 短时傅氏变换后的时频分布。

[0025] 图 10 为分离后的  $S_0$  模式 a) 时域波形, b) 短时傅氏变换后的时频分布。

[0026] 图 11 为 1 mm 均匀厚度钢板实验信号, 主要包含模式  $A_0$  和  $S_0$ , a) 时域波形, b) 短时傅氏变换后的时频分布。

[0027] 图 12 为 1 mm 均匀厚度钢板实验信号经模式  $S_0$  频散传递函数补偿后的结果, a) 时域波形, b) 短时傅氏变换后的时频分布。

[0028] 图 13 为 1 mm 均匀厚度钢板实验信号模式分离结果, a) 模式  $S_0$  时域波形, b) 模式  $S_0$  短时傅氏变换后的时频分布, c) 模式  $A_0$  时域波形, d) 模式  $A_0$  短时傅氏变换后的时频分布。

### 具体实施方式

[0029] 下面通过实施例进一步描述本发明。

[0030] 钢板超声导波频散仿真实例

下以 1 mm 均匀厚度的钢板模型为例, 介绍整个仿真算法实现过程。钢板相关参数为密度  $7.932 \text{ g/cm}^3$ , 横波速度  $3200 \text{ m/s}$ , 纵波速度  $5960 \text{ m/s}$ 。由导波理论可解得频散曲线, 如图 3 所示。仿真中所用信号源  $h(t)$  的中心频率为  $0.65 \text{ MHz}$ ,  $-3 \text{ dB}$  带宽约为  $0.4 \text{ MHz}$ , 其时域波

形和频谱如图 4 所示。由图 1 知,在若以此信号为激励,相应的频散信号中将含有  $A_o$ ,  $A_l$  和  $S_o$  三个模式。应用前述仿真方法可用信号源  $h(t)$  产生  $A_o$ ,  $A_l$  和  $S_o$  三模式混合频散信号,结果如图 5(a) 所示,用短时傅氏变换求得其时频分布结果如图 5(b) 所示(注以下都用短时傅氏变换求解时频分布,将仅用时频分布的表达不再做特别说明),其中曲线表示理论频散曲线,所用短时傅氏变换窗为  $6.25\mu s$  的高斯窗。对比理论频散曲线和时频分布图可知,  $A_o$ ,  $A_l$  和  $S_o$  三模式能量大部分集中于理论频散曲线周围,上述结果表明应用频散算法可实现多模式信号的仿真。

#### [0031] 钢板超声导波仿真信号模式补偿与分离实例

以下将采用频散补偿分析方法,对上述各模式应用其频散传递反函数加以补偿,并实现分离。首先按公式(4)、(5),对图 5 所示三模式混合波形中的  $A_l$  模式加以补偿,结果如图 6 所示。图 6(b) 椭圆中区域表示了经过频散补偿后的  $A_l$  模式所对应的能量,上述结果表明  $A_l$  模式能量被完全补偿回时间起点。从中去除激励信号即可将  $A_l$  模式能量去除。因本实例中激励信号已知,故用模式分离算法第(7)步中第一方案分离  $A_l$  模式能量。随后,用算法第(8)步对分离结果分别频散反补偿,  $A_l$  模式分离结果如图 7 所示,其中图 7(a) 为时域波形,图 7(b) 为时频分布。图 8 为去除  $A_l$  模式后的剩余欠补偿信号,其中图 8(a) 为时域波形,图 8(b) 为相应的时频分布。由图 7 与图 8 可得,应用上述算法可将  $A_l$  模式从  $A_o$ ,  $A_l$  和  $S_o$  三模式仿真信号中分离。

[0032] 重复上述步骤,即对剩余  $S_o$  和  $A_o$  的混合模式信号先用  $S_o$  或  $A_o$  频散传递函数补偿,后分离模式能量,再对分离结果频散反补偿得最终结果。图 9 为分离后的  $A_o$  模式,其中图 9(a) 为时域波形,图 9(b) 为时频分布结果;图 10 为分离后的  $S_o$  模式,其中图 10(a) 为时域波形,图 10(b) 为时频分布结果。

[0033] 观察图 7、9、10,对比原始与分离模式可得,分离后的结果与原始结果保持了较好的一致性。故应用理论频散曲线,可实现各导波模式频散的完全补偿,并且基于模式补偿原理可实现多模式信号的分离。

#### [0034] 钢板超声导波实验信号模式补偿与分离实例

以下用频散补偿分析方法,对 1mm 钢板实验超声导波信号实现频散补偿与模式分离。实验信号如图 11 所示,主要包含模式  $A_o$  和  $S_o$ ,图 10(a) 为时域波形,图 10(b) 为时频分布。经模式  $S_o$  频散传递函数补偿后的结果如图 12 所示,其中图 12(a) 为时域波形,图 12(b) 为时频分布,可见原持续时间较长(约为 0.11ms)的模式  $S_o$  被压缩为一个持续时间较短(约为 0.02ms)的脉冲信号,且在时间上与模式  $A_o$  没有交叠,可以用时间窗截取实现双模式分离。进一步对分离结果用模式  $S_o$  频散传递函数反补偿,结果如图 13 所示,其中图 13(a) (b) 分别为模式  $S_o$  时域波形及其时频分布,13(c) (d) 分别为模式  $A_o$  时域波形及其时频分布。从图 13 可知,模式  $A_o$  和  $S_o$  经本专利的算法,实现了导波模式分离。

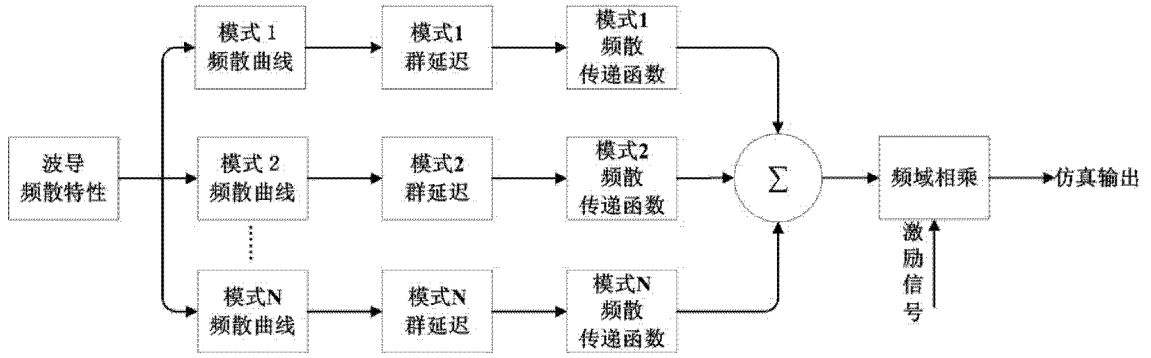


图 1

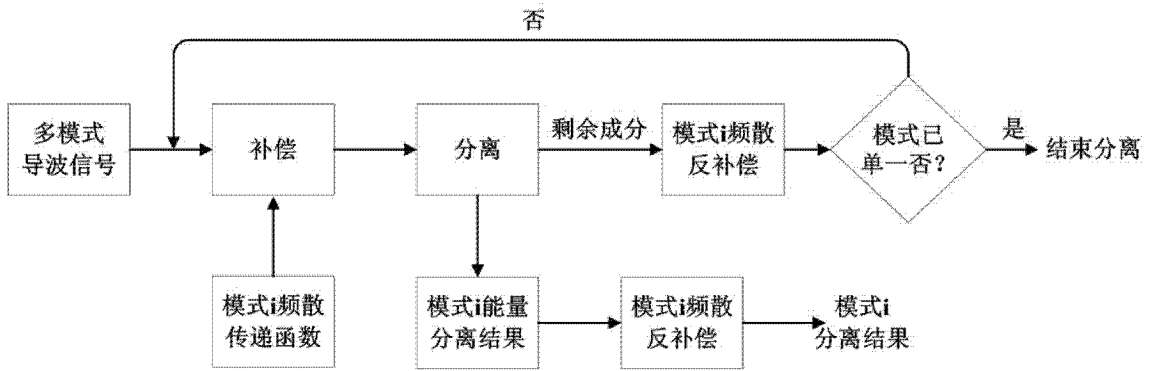


图 2

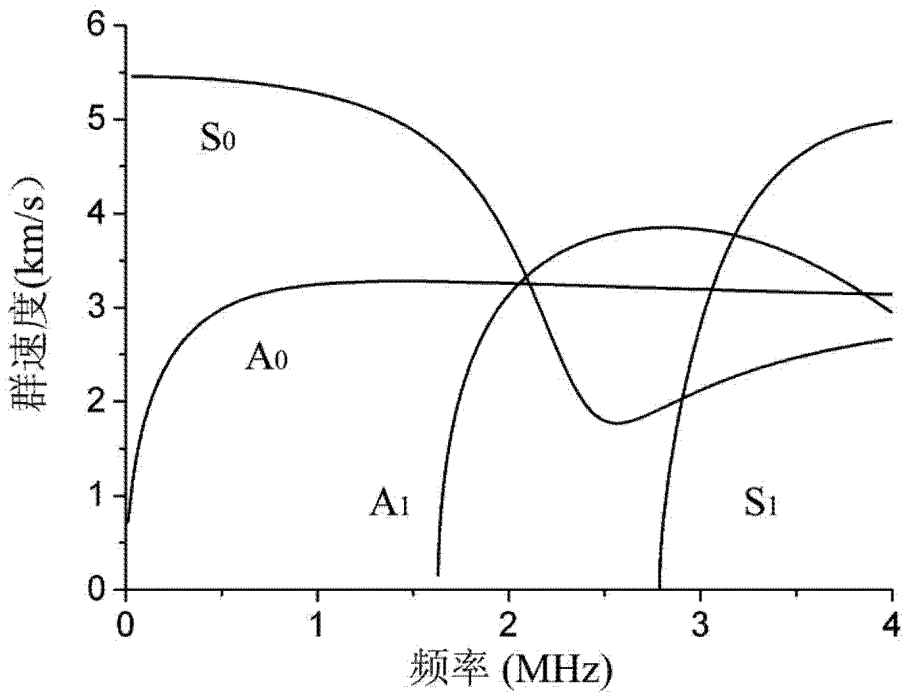


图 3

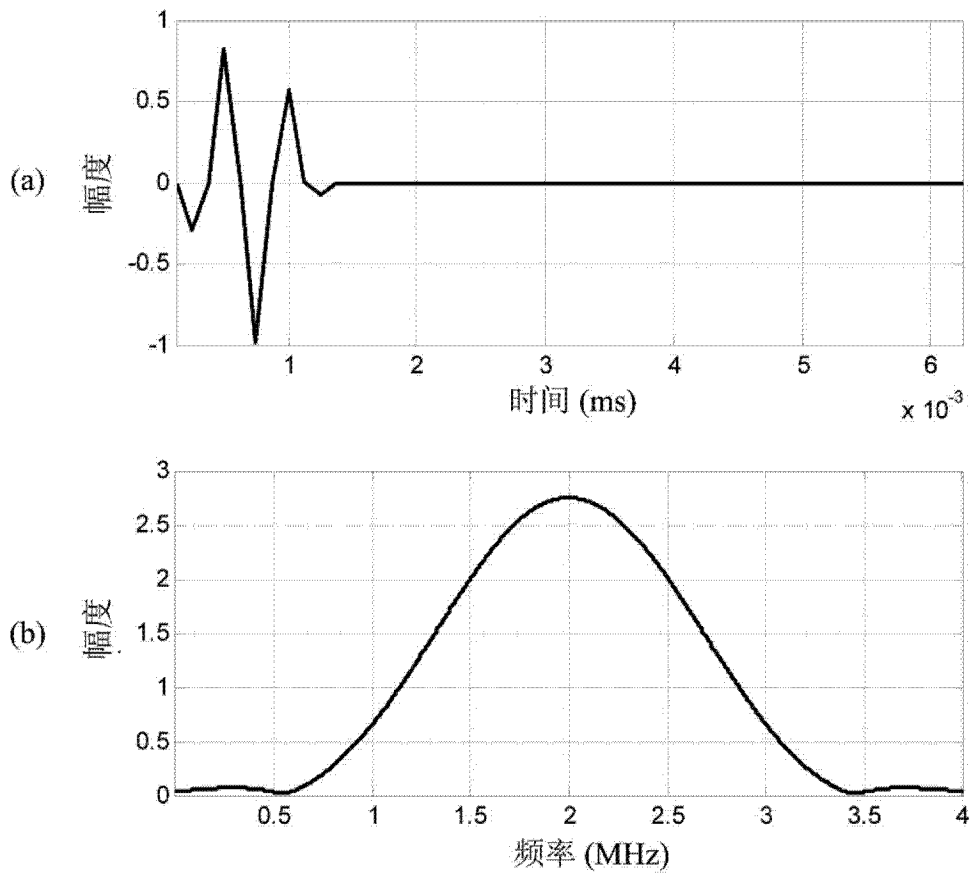


图 4

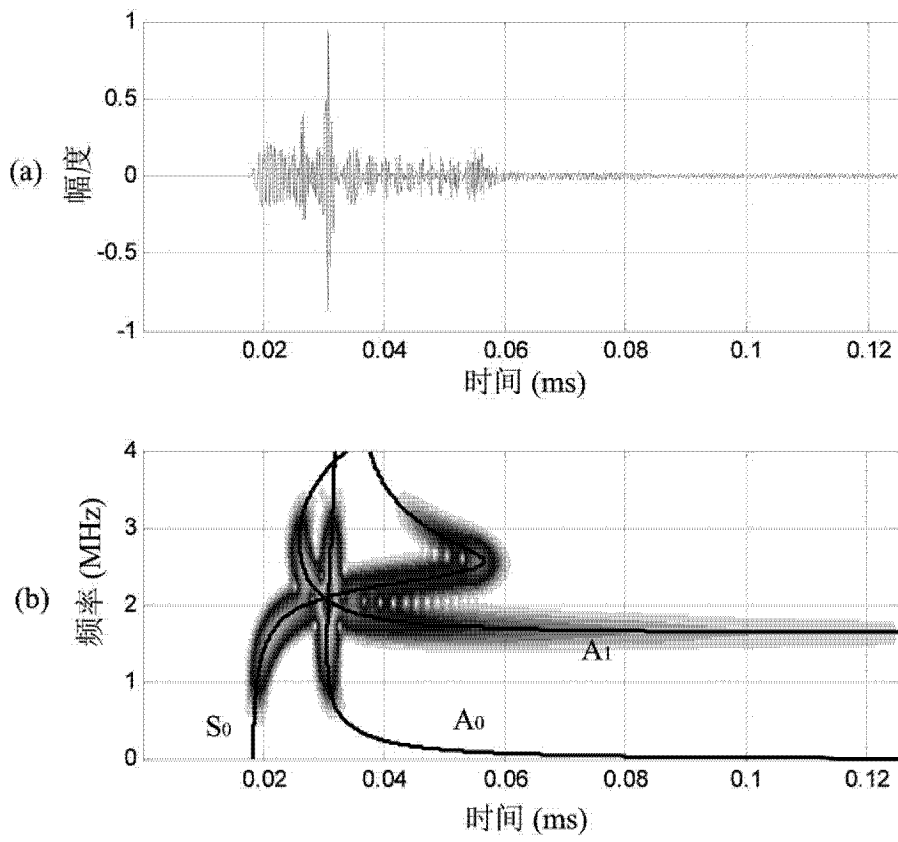


图 5

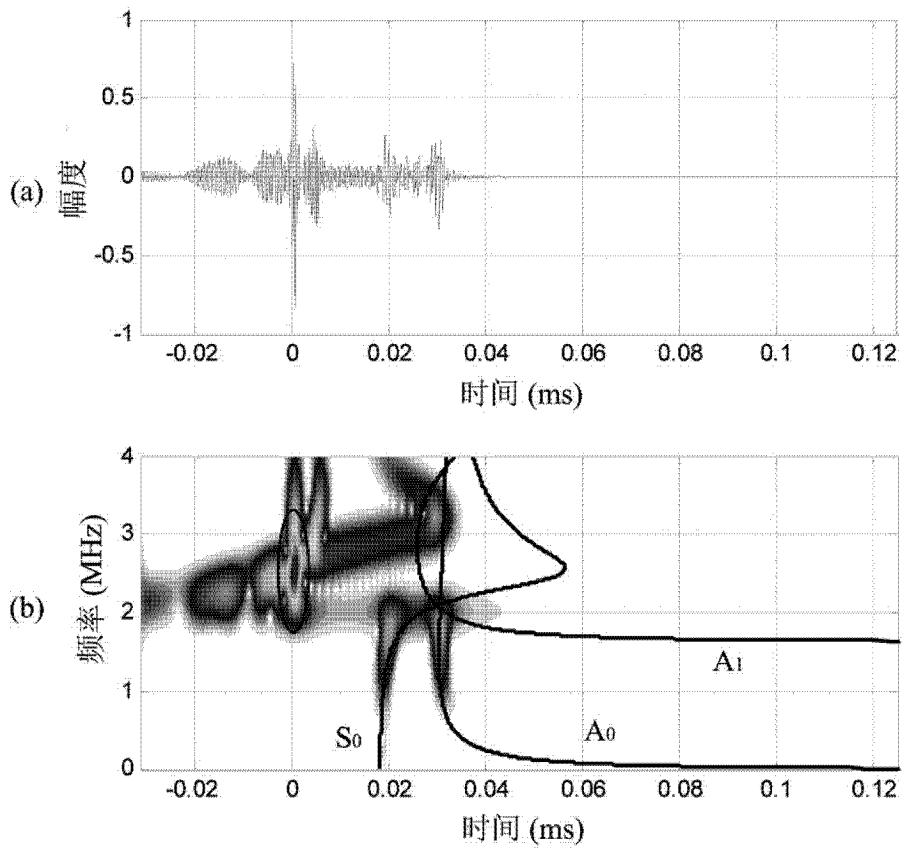


图 6

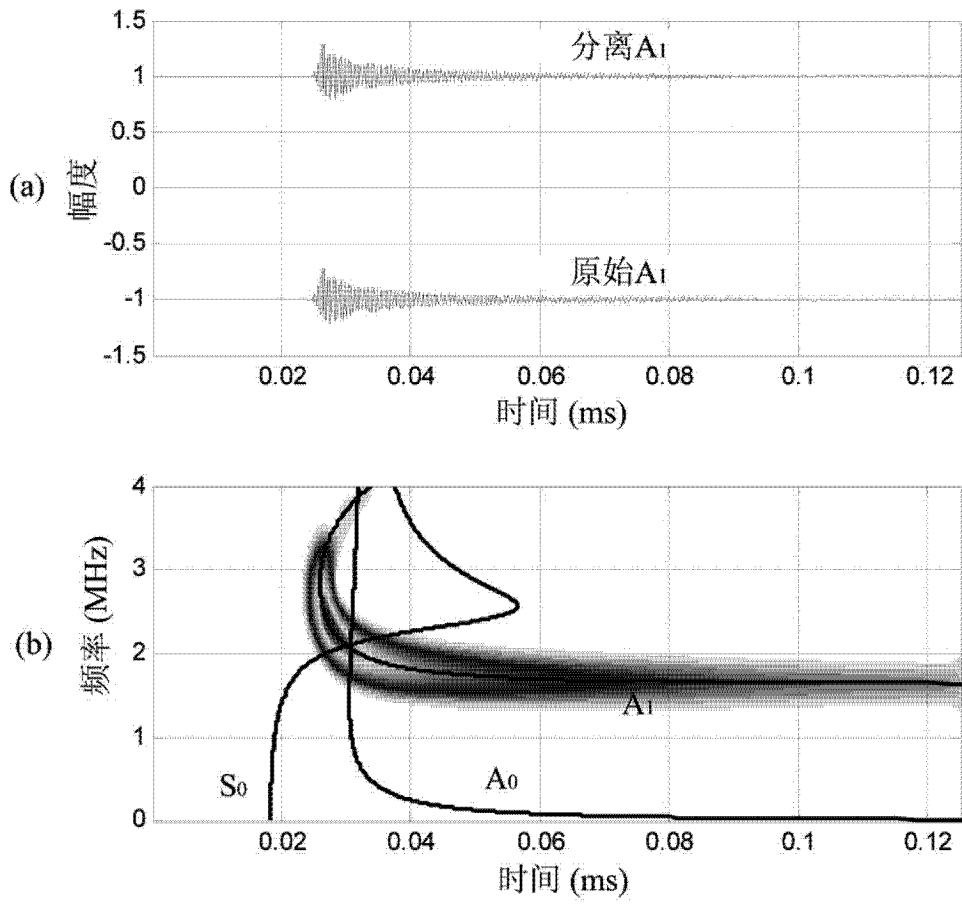


图 7

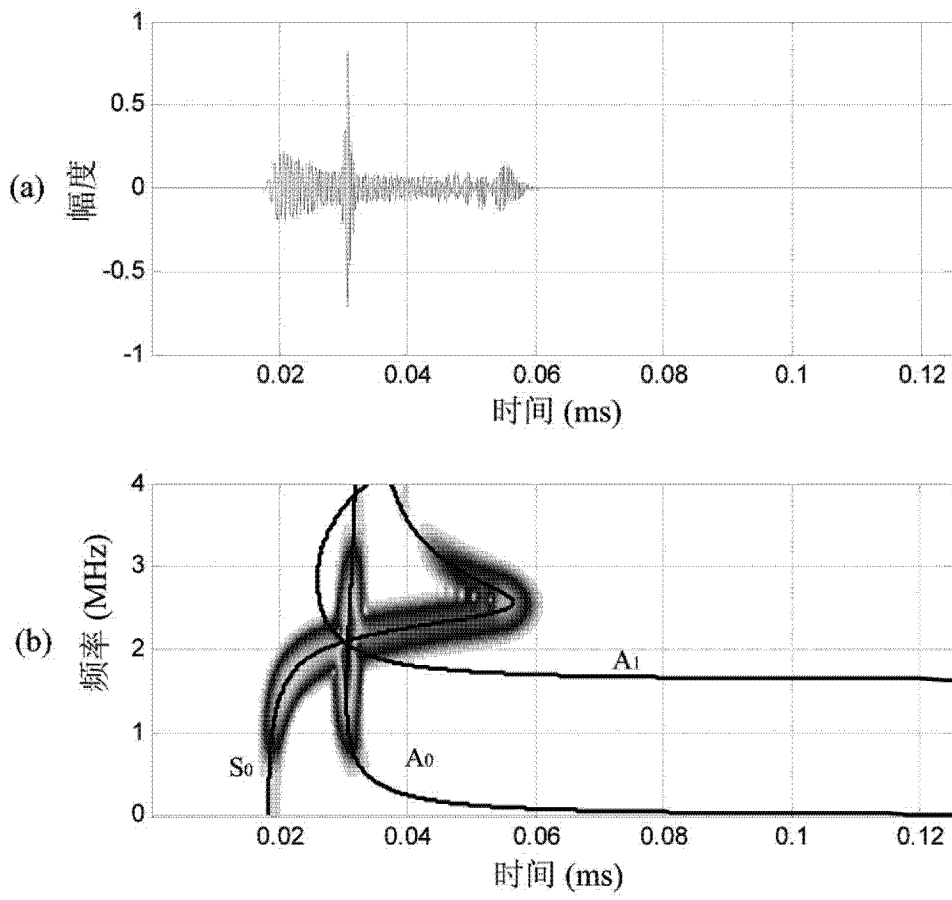


图 8

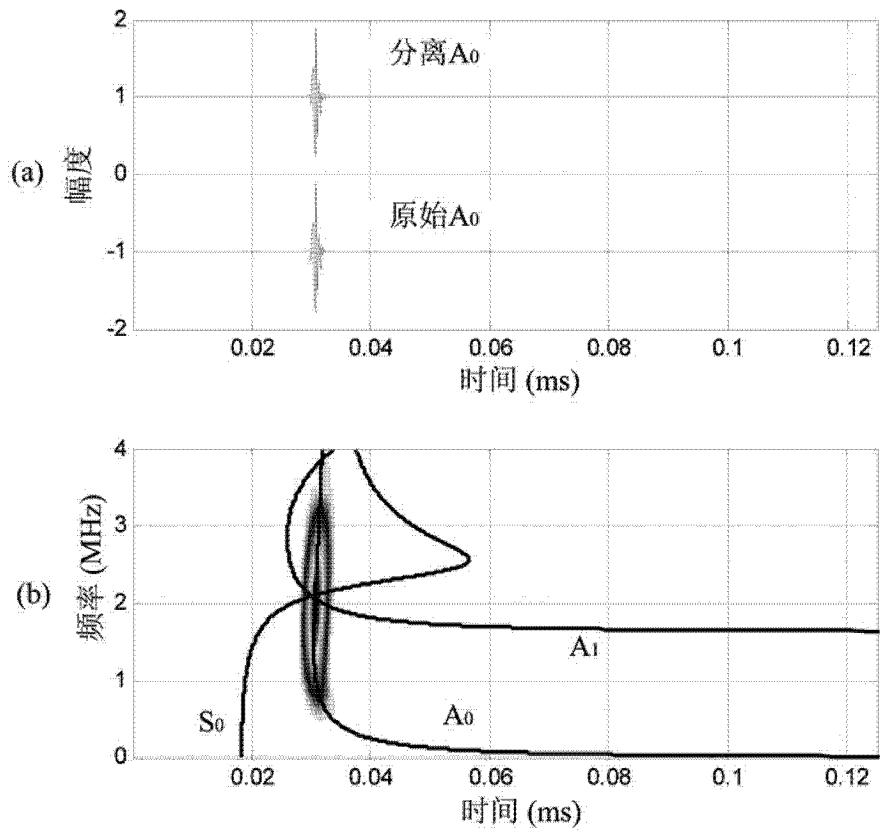


图 9

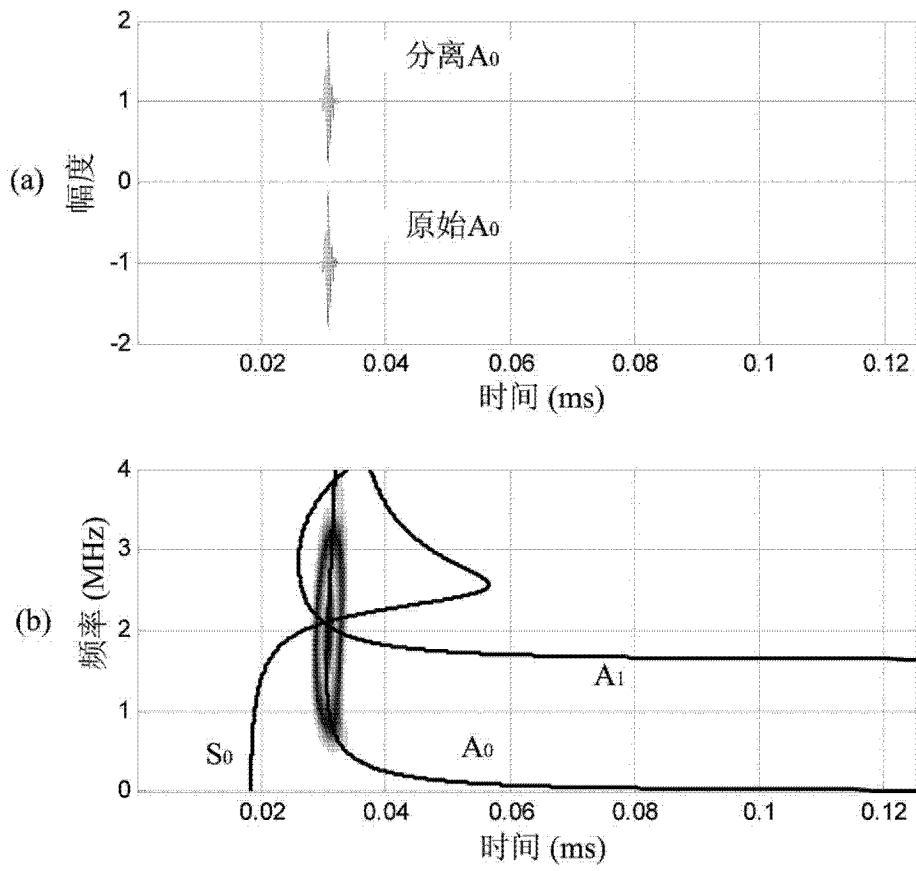


图 10

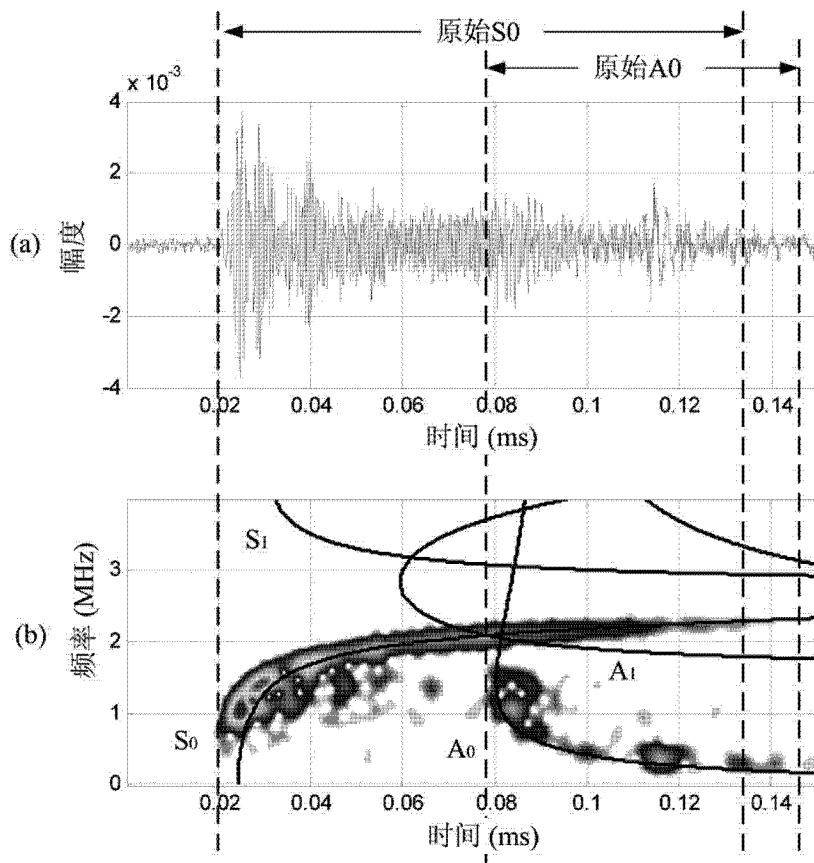


图 11

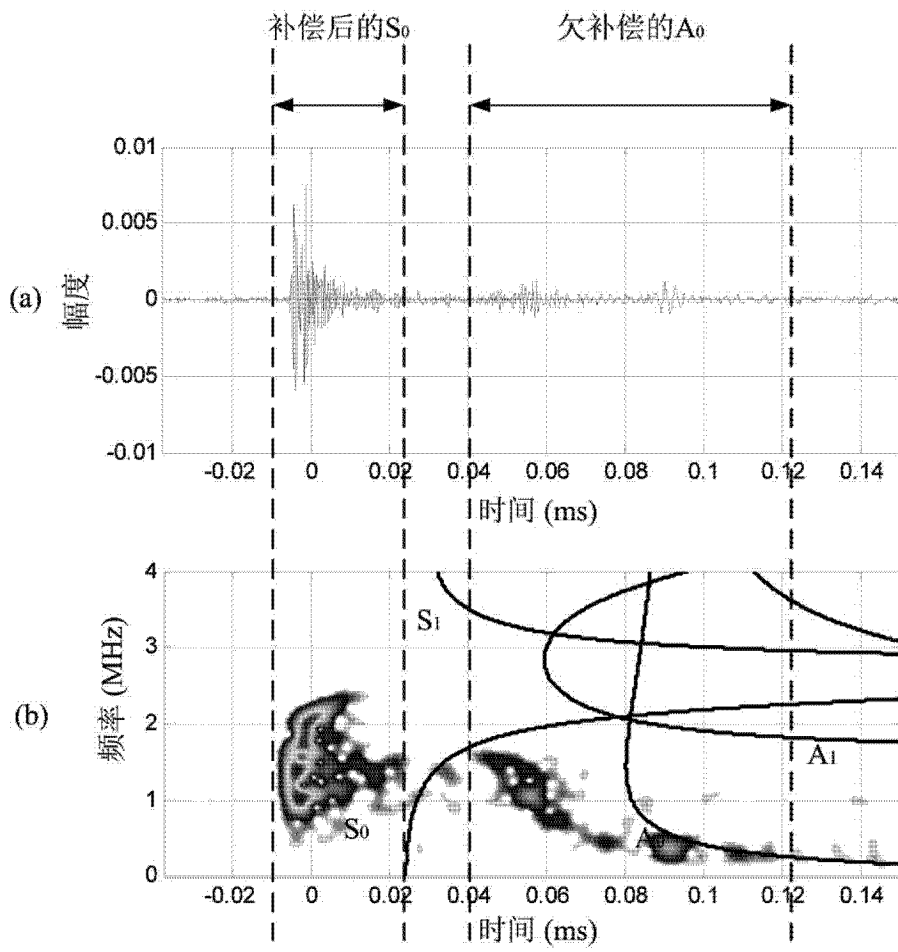


图 12

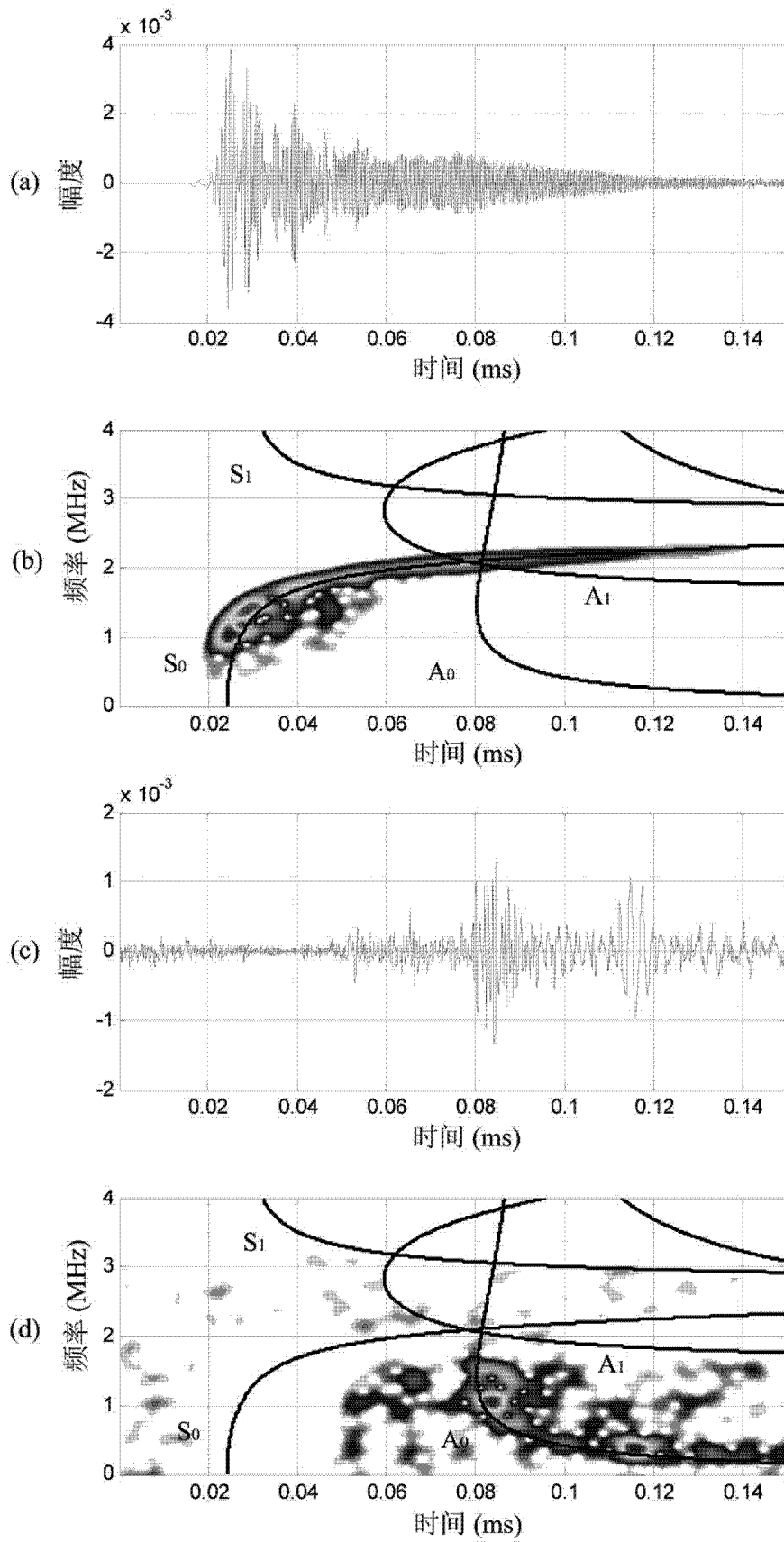


图 13

专利名称(译)	基于时域重排的超声导波频散补偿与多模式分离算法		
公开(公告)号	<a href="#">CN101982943A</a>	公开(公告)日	2011-03-02
申请号	CN201010502661.6	申请日	2010-10-11
[标]申请(专利权)人(译)	复旦大学		
申请(专利权)人(译)	复旦大学		
当前申请(专利权)人(译)	复旦大学		
[标]发明人	他得安 许凯亮 王威琪		
发明人	他得安 许凯亮 王威琪		
IPC分类号	H04B11/00 H04L25/02 A61B8/00 G06F19/00		
代理人(译)	陆飞		
其他公开文献	CN101982943B		
外部链接	<a href="#">Espacenet</a> <a href="#">SIPO</a>		

摘要(译)

本发明属于超声技术领域,具体为一种基于时域重排的超声导波频散补偿与多模式分离算法。本发明主要包括三个部分,第一部分为超声导波频散的正向仿真算法,在已知波导介质理论频散曲线(Dispersion Curve)的情况下,可求解不同频率成分的时延参数,从而获得任意激励下的多模式超声导波时域信号;第二部分为逆向频散补偿算法,可利用频散关系对单一模式导波各频率成分实现不同程度的时延修正,从而将原持续时间较长的频散模式能量压缩为瞬时冲击,使导波波形简单,易于分析。第三部分为基于逆向频散补偿算法,可实现超声导波的多模式分离。

